



УДК 620.173.25

О.С. Железков¹, Т.Ш. Галиахметов², С.Б. Лизов¹

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

г. Магнитогорск, Россия

E-mail: ferumoff@mail.ru

²АО «БелЗАН»

г. Белебей, Башкортостан, Россия

E-mail: t.galiakhmetov@belzan.ru

Дата поступления 29.04.2022

В авторской редакции

ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БОЛТОВ С ШЕСТИГРАННЫМИ ГОЛОВКАМИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Аннотация

Используя комплексный критериальный подход, выполнен поиск рациональных технологий штамповки стержневых крепежных изделий из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с шестигранными головками. В расчетах использовались критерий продольной устойчивости, силовой критерий, энергетический критерий, критерий износа инструмента, критерий разрушения и критерий расхода металла. Рассматривалось три варианта технологического процесса: холодная штамповка бочкообразной головки и её обрезка на шестигранник; холодная штамповка цилиндрической головки и безоблойная штамповка шестигранника с выдавливанием лунки; комбинированный способ, включающий холодную штамповку цилиндрической головки, нагрев и полугорячую безоблойную штамповку шестигранной головки с выдавливанием лунки.

Ключевые слова: болты с шестигранной головкой, нержавеющая сталь, критериальный подход, критерий продольной устойчивости, силовой критерий, энергетический критерий, критерий износа инструмента, критерий разрушения штампуемой заготовки, критерий расхода металла.

Введение

Крепежные изделия из коррозионно-стойких сталей широко используются в атомной энергетике, нефтяной и газовой промышленности, авиа- и судостроении, медицинской технике, пищевой промышленности и других отраслях. При изготовлении стержневых крепежных изделий (болты, винты, шурупы и т.п.) используются специальные кузнечнопрессовые машины и многопереходные технологические процессы, включающие разнообразные методы холодного и горячего пластического деформирования (штамповка, высадка, выдавливание, редуцирование, накатка резьбы и т.п.) [1-4]. Поиск рациональных способов, схем и режимов деформирования с использованием современных методов исследования процессов обработки метал-

лов давлением позволяет решать актуальные проблемы повышения качества крепежных изделий и эффективности их производства.

Основная часть

В работах [5,6] изложены основные положения методики поиска рациональной технологии изготовления изделий с использованием многопереходных процессов пластического деформирования на основе комплексного критериального подхода. Согласно разработанной методике, вначале определяется несколько вариантов возможных технологии с различным формоизменением и режимами деформирования. Затем, используя современные методы натурального и компьютерного моделирования процессов ОМД, по каждому варианту технологии определяются основные параметры (напряжения, деформации, силы и работа

деформации, условия устойчивости штампуемой заготовки, ресурс пластичности, качество изделий и т.п.). Для каждого параметра определяется свой критерий:

$$K_{II} = \frac{II_i}{II_{max}}, \quad (1)$$

где II_i – параметр для i -го варианта технологии;

II_{max} – параметр для варианта технологии, при использовании которой он принимает максимальное значение.

По каждому варианту технологии критерии суммируются и за основу принимается технология, для которой суммарный критерий имеет минимальное значение.

При поиске рациональной технологии изготовления стержневых крепежных изделий с шестигранной головкой рассматривались три варианта технологического процесса:

- холодная штамповка бочкообразной головки и её обрезка на шестигранник (рисунок 1, вариант I);
- холодная штамповка цилиндрической головки и безоблойная штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (рисунок 2, вариант II);
- комбинированный способ, включающий холодную штамповку цилиндрической головки, нагрев и полугорячую безоблойную штамповку шестигранной головки с выдавливанием лунки (рисунок 3, вариант III).

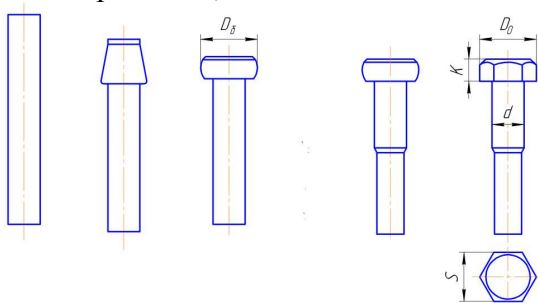


Рисунок 1. Схема технологического процесса изготовления болтов с обрезкой головки на шестигранник (вариант I)

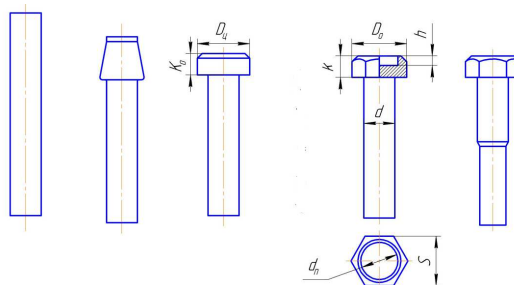


Рисунок 2. Схема технологического процесса изготовления болтов с использованием безоблойной штамповки головки (вариант II)

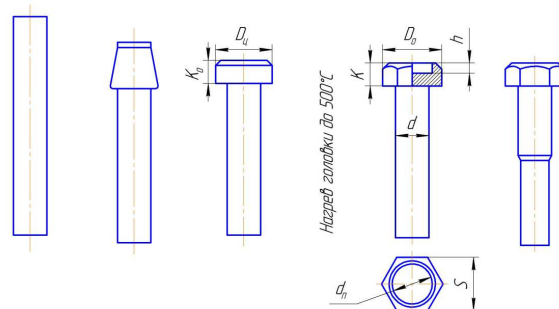


Рисунок 3. Схема комбинированного способа изготовления болтов с использованием полугорячей безоблойной штамповки головки (вариант III)

При моделировании вариантов II и III, когда окончательная штамповка шестигранной головки осуществляется за счет выдавливания торцевой лунки, рассматривалась различная относительная глубина лунки $h/k = 0,3$ и $h/k = 0,6$.

При поиске рациональной технологии использовались критерий продольной устойчивости, силовой критерий, энергетический критерий, критерий износа инструмента, критерий разрушения и критерий расхода металла.

При штамповке болтов стабильность процесса деформирования зависит от относительных размеров штампуемого участка заготовки. Для оценки возможности осуществления процесса штамповки без потери продольной устойчивости штампуемого участка применяется параметр, который называется коэффициентом высадки:

$$k_e = l_0 / d_0, \quad (2)$$

где l_0 – длина высаживаемого участка;

d_0 – диаметр исходной заготовки.

При большой величине k_e возможна потеря устойчивости, то есть продольный

изгиб штампуемого участка заготовки, что приводит к возникновению брака.

На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также практического опыта установлено, что при предварительной штамповке головки за один переход коэффициент высадки k_e не должен превышать 2,3. Если $k_e \geq 2,3$, то штамповку головки необходимо осуществлять за несколько переходов [7,8].

Таким образом, критерий продольной устойчивости:

$$K_{ПУ} = \frac{k_{e_i}}{k_{e_{\max}}}, \quad (3)$$

где k_{e_i} - коэффициент высадки по i -ой технологии;

$k_{e_{\max}}$ - коэффициент высадки по технологии, при которой он принимает максимальное значение.

При разработке технологических процессов штамповки крепежных изделий необходимо стремиться к снижению сил деформирования и энергетических затрат, что обеспечивает повышение стойкости технологического инструмента и снижение затрат электроэнергии, что в конечном итоге сказывается на экономической эффективности производства. При разработке новых технологических процессов штамповки крепежных изделий следует подобрать такие способы и методы, при которых требуемая форма изделия получается простейшим путем с наименьшими затратами сил и энергии.

Используя результаты компьютерного или натурального моделирования, для каждого варианта технологии определяются максимальные усилия деформирования и рассчитывается силовой критерий K_c :

$$K_c = \frac{F_i}{F_{\max}}, \quad (4)$$

$$A^* = \int_0^{z_k} [k_1(z)^5 + k_2(z)^4 + k_3(z)^3 + k_4(z)^2 + k_5(z)] dz \quad (6)$$

После соответствующих вычислений получаем работу деформации:

$$A^* = \left[\frac{1}{6} k_1(z)^6 + \frac{1}{5} k_2(z)^5 + \frac{1}{4} k_3(z)^4 + \frac{1}{3} k_4(z)^3 + \frac{1}{2} k_5(z)^2 \right] \Big|_0^{z_k} \quad (7)$$

где F_i – максимальная сила штамповки для i -го варианта технологии;

F_{\max} - максимальная сила штамповки для варианта технологии, при которой F_i принимает самое большое значение.

При нахождении энергетического критерия вначале для каждого варианта технологии на основании либо компьютерного моделирования, либо экспериментальных данных строится диаграмма $F=f(z)$ зависимости силы деформирования F от перемещения инструмента z . Типичная кривая представлена на рисунке 4.

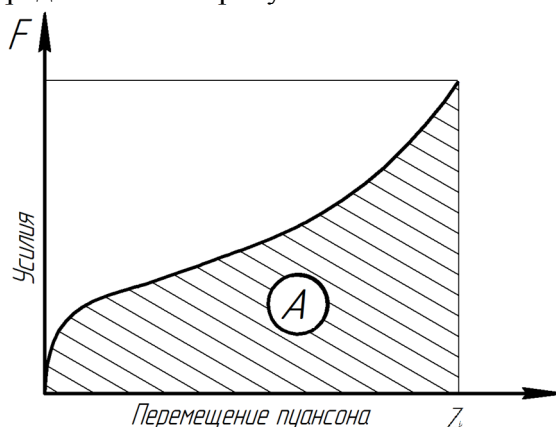


Рисунок 4. Диаграмма зависимости силы деформирования F от перемещения пуансона z

С высокой степенью точности кривую $F=f(z)$ можно аппроксимировать полиномом пятой степени:

$$F = k_1(z)^5 + k_2(z)^4 + k_3(z)^3 + k_4(z)^2 + k_5(z) \quad (5)$$

Работу деформации A^* предлагается определять, как площадь фигуры, ограниченной кривой $F=f(z)$ и осью абсцисс z (заштрихованная площадь участок на рисунке 4.). Для определения заштрихованной площади вычисляется интеграл от уравнения (5) в пределах от 0 до z_k , где z_k - полный ход инструмента за весь этап деформирования:

Рассматриваются различные варианты штамповки болтов и для каждого варианта определяется работа деформации, после чего вычисляется энергетический критерий:

$$K_9 = \frac{A_i^*}{A_{\max}^*}, \quad (8)$$

где A_i^* - работа деформации при штамповке по i - ому варианту технологии;

A_{\max}^* - работа деформации при штамповке по варианту, при котором работа имеет максимальное значение.

Износостойкость инструмента для штамповки крепежа существенно влияет на эффективность производства и этот фактор необходимо учитывать при поиске рациональных технологий. В разработанной методике при определении критерия износостойкости инструмента использовалась энергетическая теория изнашивания твердых тел [9,10], согласно которой объемный износ ΔW пропорционален работе сил на преодоление трения A_{mp} в зоне контакта, то есть:

$$\Delta W = J_\omega \cdot A_{mp}, \quad (9)$$

где J_ω ($\text{м}^3/\text{Дж}$) - показателя энергетической интенсивности изнашивания, который определяется на основании экспериментальных исследований с использованием специального оборудования (машины трения).

В общем случае работа сил трения:

$$A_{mp} = F_{mp} s = \mu F_{\text{норм}}, \quad (10)$$

где F_{mp} - сила трения, Н;

μ - коэффициент трения;

$F_{\text{норм}}$ - сила нормального давления, Н;

s - перемещение металла по поверхности инструмента, м.

В разработанной методике критерий износа инструмента определялся по формуле:

$$K_{II} = \frac{A_{mpi}}{A_{mp\max}}, \quad (11)$$

где A_{mpi} - работа сил трения при штамповке по i -ому варианту технологии;

$A_{mp\max}$ - работа сил трения при штамповке по варианту технологии с максимальными силами трения.

При анализе различных вариантов однотипных процессов пластического деформирования и оценки влияния напряженно-деформированного состояния на образование микродефектов используется известный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма (Cockcroft & Latham) [11]. Этот критерий можно определить по результатам расчетов, выполненных с использованием программного комплекса «DEFORM-3D».

В общем случае критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма определяется по формуле:

$$D = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma^*}{\sigma_i} d\varepsilon_i, \quad (12)$$

где ε_i – интенсивность деформаций по Мизесу;

σ^* – максимальное главное растягивающее напряжение;

σ_i – интенсивность напряжений по Мизесу.

Относительный критерий разрушения:

$$K_D = \frac{D_i}{D_{\max}}, \quad (13)$$

где D_i - максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма при штамповке по i -ому варианту технологии;

D_{\max} - максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма по варианту, при котором этот критерий принимает самое максимальное значение.

Важным экономическим фактором, влияющим на эффективность производства крепежных изделий, является расход металла на единицу выпущенной продукции. Отходы металла возникают в связи с необходимостью удаления переднего и заднего концов прутка или бунта, удаления заготовок при отработке и наладке процесса штамповки, а также при реализации отработанной технологии. Например, в случае использования технологии по варианту I (см. рисунок 1) при обрезке бочкообразной головки на шестигранник срезаемый металл уходит в отходы. А при использовании безоблойной штамповки с выдавливанием

лунки (варианты II и III) обеспечивается экономия металла.

Критерий расхода металла:

$$K_{PM} = \frac{V_i}{V_{max}}, \quad (14)$$

где V_i - объем головки перед окончательным формированием шестигранника для i -ой технологии;

V_{max} - объем головки перед окончательным формированием шестигранника для

технологии, по которой объем максимальный.

Для каждой из рассматриваемых технологий критерии суммируются и за основу берется технология, по которой суммарный критерий принимает минимальное значение. В таблице представлены результаты поиска рациональной технологии изготовления стержневых изделий с шестигранной головкой из нержавеющей стали.

Таблица

Результаты поиска рациональной технологии изготовления болтов из нержавеющей стали

Вариант технологии	Особенности	$K_{ПУ}$	K_C	$K_Э$	$K_{И}$	K_D	K_{PM}	$\sum K$
Штамповка бочкообразной головки и обрезка на шестигранник (вариант I)	Односторонняя обрезка	1	0,89	0,85	1	1	1	5,74
	Двухсторонняя обрезка	1	0,87	0,86	0,81	0,78	1	5,32
Штамповка цилиндрической головки и штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (вариант II)	$\frac{h}{K} = 0,3$	0,72	0,93	0,91	0,89	0,61	0,91	4,97
	$\frac{h}{K} = 0,6$	0,63	1	1	0,95	0,65	0,81	5,04
Штамповка цилиндрической головки, нагрев и штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (вариант III)	$\frac{h}{K} = 0,3$	0,72	0,83	0,75*	0,84	0,58	0,91	4,63
	$\frac{h}{K} = 0,6$	0,63	0,86	0,77*	0,87	0,60	0,81	4,54

*Примечание: Без учета затрат энергии на нагрев

Заключение

1. При использовании технологий по варианту I, включающих высадку бочкообразной головки с последующей её обрезкой на шестигранник, предпочтительно использовать двухстороннюю обрезку.
2. При использовании технологии, включающей штамповку цилиндрической головки и штамповку шестигранника с выдавливанием лунки (вариант II), суммарные критерии при различной глубине лунки отличаются незначительно.
3. У технологий, включающих безоблойную штамповку с промежуточным нагревом до температуры 400-500°C и

выдавливанием торцевой лунки (вариант III), лучший суммарный критерий. Однако такие технологии требуют создания нового технологического оборудования: либо линии, включающей холодновысадочный автомат, нагревательное устройство и пресс для горячей окончательной штамповки, либо автоматическую роторную линию с ротором нагрева.

4. Вышеизложенные результаты теоретических и экспериментальных исследований использовались при разработке и освоении технологии изготовления винтов М6 с длиной стержня 12÷20 мм (ОСТ 1 31501-80) с шестигранной головкой из нержавеющей стали марки 12X18H10T в условиях АО «Бел-

ЗАН». (г. Белебей). Экономический эффект - 6,2 млн. руб.

Библиографический список

1. Мокринский, В.И. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий / В.И. Мокринский, О.С. Железков // Сер. Метизное производство. Вып. 2. - М.: Ин-т Черметинформация. - 1990. - С. 22.
2. Васильев, С.П. Производство крепежных изделий. / М.: Металлургия - 1981. - С. 102.
3. Воробьев, И.А. Крепежные изделия для современного машиностроения / И.А. Воробьев, С.В. Овчинников, Г.В. Бунатян, Т.Ш. Галиахметов и др. // Нижний Новгород: МПК-сервис. - 2016. - С. 520.
4. Петриков, В.Г. Прогрессивные крепежные изделия/ В.Г. Петриков, А.П. Власов // М.: Машиностроение. - 1991.- С. 256.
5. Железков, О.С. Поиск рационального формоизменения в многопереходных процессах пластической деформации на основе комплексного критериального подхода/ О.С. Железков, С.А. Малаканов, С.О. Железков / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2015, № 4.- С. 18-22.
6. Малаканов, С.А. Критериальный подход при проектировании технологических процессов производства крепежных изделий и пружинных клемм / С.А. Малаканов, О.С. Железков, Т.Ш. Галиахметов и др. // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова. 2017. - С. 102.
7. Биллигман И. Высадка и другие методы объемной штамповки / М.: Машгиз, 1960. - С. 457.
8. Мисожников, В.М. Технология холодной высадки металлов/ В.М. Мисожников, М.Я. Гринберг // - М.: Машгиз, 1951. - С. 307.
9. Крагельский, И.В. Трение и износ// - М.: Машиностроение. 1968. -С. 480.
10. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безизносность)// - М.: «Изд-во МСХА», 2001. - С. 616.
11. Cockcroft M.G., Latham D.J. A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals // National Eng. Laboratory Report 240, July 1966, See also "Ductility and Workability of Metals", Journal of the Institute of Metals. - V. 96. - 1968. - P. 33.

Information about the paper in English

O.S. Zhelezkov¹, T.Sh. Galiakhmetov², S.B. Lizov¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia

E-mail: ferumoff@mail.ru

²JSC BelZAN

Belebey, Bashkortostan, Russia

E-mail: t.galiakhmetov@belzan.ru

Received 29.04.2022

SEARCHING FOR FEASIBLE TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING HEXAGON-HEAD BOLTS FROM STAINLESS STEEL, APPLYING AN INTEGRATED CRITERION APPROACH

Abstract

By applying an integrated criterion approach, the authors searched for feasible technologies of stamping hexagon-head bolts from stainless steel grade 12Kh18N10T. The calculations included a longitudinal stability criterion, a force criterion, an energy criterion, a tool wear criterion, a criterion of damage and a steel consumption criterion. Three options of the process were under consideration: cold stamping of a rivet head and cutting it as a hexagon; cold stamping of a cylindrical head and closed die stamping of the hexagon with a hole extrusion; a combined process, including cold stamping of a cylindrical head, heating and semi-hot closed die stamping of the hexagon head with a hole extrusion.

Keywords: hexagon-head bolts, stainless steel, criterion approach, longitudinal stability criterion, force criterion, energy criterion, tool wear criterion, criterion of damage of the stamped workpiece, steel consumption criterion.
